

# ВАЛКОВОЕ БРИКЕТИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ БРИКЕТОВ

## ROLL BRIQUETTING OF ASYMMETRICAL BRIQUETTES

Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Буркин С.П.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, unl@mtf.ustu.ru

In article research of influence of asymmetrically execution of walls of cells of rolls of a roll press on characteristics of process of consolidation is executed. For the solution of a task kinematic boundary conditions are formulated, consolidation and pushing off zones are described. Search of options of configurations of cells is executed. The modeling experiments which have confirmed conclusions of a settlement part of work are executed.

В порошковой металлургии используется способ валкового формования порошков металлов в валках с гладкой цилиндрической поверхностью [1-3] и в калибрах [4,5]. Формование сыпучих материалов в валках, снабженных ячейками, получило распространение в металлургической промышленности как способ придания сырым материалам формы, пригодной для дальнейшей переработки в плавильных агрегатах [6].

Для улучшения условий захвата и повышения производительности процесса уплотнения применяют валки с ячейками. Рассмотрим схему уплотнения сыпучего материала двумя вращающимися валками радиусом  $R$  с

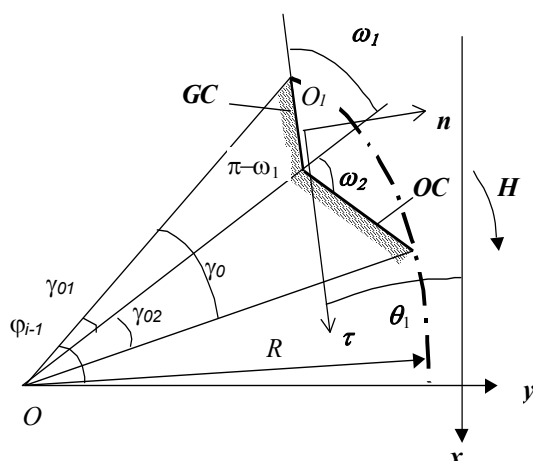


Рис.1. Угловые соотношения в несимметричной ячейке валка

выполненными по окружности ячейками треугольного профиля (рис.1). Введем две декартовых системы координат: неподвижную  $xOy$  и подвижную  $nO_1\tau$ . Ось  $y$  первой неподвижной системы координат лежит в плоскости, соединяющей оси валков, ось  $x$  имеет направление, совпадающее с направлением прокатки. Вторая система координат вращается совместно с валком, причем ось  $\tau$  является касательной к контактной поверхности ячейки, а ось  $n$  является нормальной к этой поверхности. При криволинейной поверхности ячейки угловые соотношения между первой и второй системами координат являются функциями от положения точки на линии, являющейся образующей ячейки.

Введем также понятия нагнетающей стенки ячейки  $GC$  и оппозитной  $OC$ . При вращении валка в направлении стрелки  $H$  нагнетающая стенка ячейки  $GC$  захватывает часть сыпучего материала из бункера и увлекает в очаг деформации. Роль оппозитной стенки заключается в формировании контура брикета.

Как видно из рисунка, в отличие от прокатки на гладких валках, на нагнетающей стенке  $GC$  вектор нормальной к контактной поверхности силы не направлен вдоль радиуса валка, и поэтому известные из теории прокатки формулы для оценки угла захвата становятся не применимы.

Центральный угол  $\gamma_0$ , состоящий из углов  $\gamma_{01}$  и  $\gamma_{02}$ , опирается на длину дуги, равную длине брикета  $A$ , и поэтому может быть найден из

соотношения  $\gamma_0 = \gamma_{01} + \gamma_{02} = \frac{A}{R}$ , при

известной длине ячейки

$$a_c = a_{c1} + a_{c2} = 2R \cdot \sin \frac{\gamma_0}{2}, \quad (1)$$

где  $a_{ck}$  ( $k=1,2$ ) – проекции длин нагнетающей и оппозитной стенок на линию, соединяющую границы ячейки.

Удобно ввести понятие показателя формы ячейки  $m = a_{c1}/a_c$ , который показывает, насколько разнятся длины нагнетающей и оппозитной стенок ячейки, диапазон изменения этой величины составляет  $m=0 \dots 1$ . Центральные углы, характеризующие длины стенок ячейки, находятся из выражения

$$\gamma_{0k} = \frac{\gamma_0}{2} - \arcsin \frac{\frac{a_c}{2} - a_{ck}}{R - b_c}, \quad (2)$$

где  $b_c$  – глубина ячейки.

Углы при вершине ячейки определяются выражениями

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \arctg \frac{a_{c1}}{b_c} = \arctg \frac{2a_{c1}}{B - \delta}, \\ \omega_2 &= \arctg \frac{a_{c2}}{b_c} = \arctg \frac{2a_{c2}}{B - \delta} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $b_c$ ,  $B$  и  $\delta$  – глубина ячейки, толщина брикета и зазор между валками соответственно.

Разность между проекцией на ось  $x$  радиуса валка в верхней точке ячейки и в нижней точке

$$R \cdot \sin \varphi_{i-1} - R \cdot \sin(\varphi_{i-1} - \gamma_0) = GC \cdot \cos \theta_1 + OC \cdot \cos \theta_2, \quad (4)$$

где  $\varphi_{i-1}$  - центральный угол, отсчитываемый от плоскости, соединяющей оси валков, до радиус-вектора верхней точки ячейки, а длина  $GC$

ячейки равна проекции стенок ячейки на ту же ось:

нагнетающей стенки ячейки и длина оппозитной стенки определяются формулами

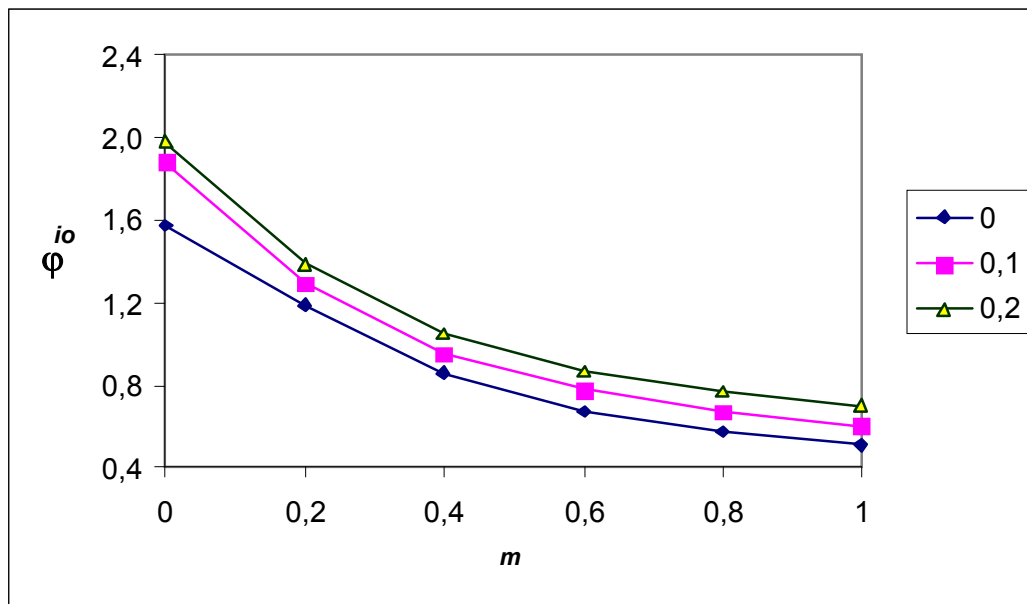


Рис.2. Зависимость угла поворота валка от параметра  $m$  при различных значениях коэффициента трения (числа в таблице), параметрах инструмента  $R=175\text{мм}$ ,  $\delta=1\text{мм}$  и параметрах брикета  $A=75\text{мм}$ ,  $B=45\text{мм}$

$$GC = a_{c1} / \sin \omega_1; \quad (5)$$

$$OC = a_{c2} / \sin \omega_2 \quad (6)$$

Используем введенные ранее безразмерные величины, характеризующие длины сторон ячейки:  $a_{c1} = m \cdot a_c$  и  $a_{c2} = (1 - m) \cdot a_c$ . Явным образом решить уравнение (4) относительно величины  $\varphi_{i-1}$  не представляется возможным, поэтому решение было найдено численным способом методом итераций.

Результаты расчета для различных значений коэффициента трения приведены на рис.2. Из рассмотрения рисунка видно, что при малых значениях  $m$  захват наступает при расположении ячейки на большом расстоянии от плоскости, соединяющей оси валков. На первый взгляд это является благоприятным фактором, позволяющим осуществлять процесс уплотнения на большой дуге захвата, и тем самым уплотнять материал с большими объемными деформациями. Благоприятно влияет на увеличении дуги захвата и повышение коэффициента трения, что не противоречит традиционным представлениям.

Используя условия статического равновесия с учетом равенства контактных площадей, получим равенство нулю суммы

проекций на ось  $x$  распределенных сил, действующих на поверхности нагнетающей и оппозитной (индексы  $i=1$  и  $2$  соответственно) стенок ячейки в момент захвата очередной порции сжимаемой среды:

$$\frac{G}{F_b} + \tau \cdot \cos \theta_i + p \cdot \sin \theta_i = 0 \quad (5)$$

где  $\tau$  и  $p$  - касательные и нормальные напряжения на стенках ячейки, связанные, например, через закон Кулона:  $\tau = \mu \cdot p$ ;

$G$  и  $F_b$  - усилие, развиваемое подпрессовщиком (при его наличии) и площадь приложения этого усилия соответственно, более подробно влияние усилия подпрессовщика на условия захвата проанализировано в статье [7].

Поскольку угол  $\theta_i$  отсчитывается от положительного направления оси  $x$ , то значение функции синуса при вращении валка может измениться от отрицательного значения до положительной величины. При отрицательном значении вектор проекции нормального напряжения направлен против направления прокатки, и это напряжение препятствует захвату частиц сыпучей среды, при положительном значении, как силы трения, так и силы нормального давления способствуют захвату. Состояние

равновесия между ними определит момент захвата очередной порции материала. Оценим его формулой, полученной из предыдущего выражения путем некоторых преобразований и наличии упрощения – равенства нулю усилия подпора:

$$\theta_i = -\arctg\mu \quad (6)$$

По аналогии с методами, принятыми в теории традиционной прокатки, можно сформулировать правило захвата в следующем виде. Частицы сыпучей среды увлекаются в очаг деформации в том случае, когда проекция на

направление прокатки вектора напряжения трения  $\sigma_\tau$  превысит проекцию вектора нормального напряжения  $\sigma_n$ , тогда в условиях равновесия и при использовании закона трения по Кулону получим  $\theta_i = -\arctg\mu$ , где  $\mu$  – коэффициент трения по Кулону. Подставив последнее условие в уравнение (7), найдем угол  $\varphi_0$ , при котором возможен захват нагнетающей стенкой ячейки:

$$R \cdot \sin \varphi_0 - R \cdot \sin(\varphi_0 - \gamma_0) = GC \cdot \cos(-\arctg\mu) + OC \cdot \cos\theta_2, \quad (7)$$

Следует отметить, что при отсутствии трения ( $\mu=0$  и  $\arctg\mu=0$ ) захват гладкими валками, не снабженными ячейками, вообще невозможен. Последняя формула и вид графика на рис.2 показывают, что при наличии на поверхности валка ячеек захват возможен и при отсутствии трения, что достигается защемлением очередной порции сыпучей среды профилем ячейки. В целом рост угла захвата наблюдается при увеличении коэффициента трения и увеличении размеров брикета. При этом при наличии несимметрии длины нагнетающей и оппозитной стенок брикета для улучшения условий захвата, судя по формуле (7), следует параметр назначать  $m$  небольшим по величине. Однако на этом пути встают ограничения по назначению углов  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , что поясняется изображением развертки продольного профиля ячейки с различными значениями  $m$ , приведенном на рис.3. Здесь линии  $GC$  и  $OC$  ограничивают профиль ячейки, построенный таким образом, что площадь продольного сечения ячейки остается постоянной при любом  $m$ , поскольку основания и высоты полученных треугольников задаются

равными. Угол  $\omega = \omega_1 + \omega_2$  характеризует угол при вершине ячейки в целом. Из практики формирования брикетов известно, что при малых углах при вершине ячейки затрудняется извлечение брикета из ячейки. Как это видно из рассмотрения рис.3, наибольший угол  $\omega = \omega_1 + \omega_2$  достигается при симметричном расположении стенок, что характеризуется показателем  $m=0,5$ . Наименьшие значения  $\omega$  достигаются при максимальном смещении вершины ячейки либо вдоль, либо против направления вращения валка ( $m=0$  или  $m=1$ ). В этих крайних положениях угол  $\omega$  становится острым. При  $m=0$  формируются наилучшие условия для захвата частиц сыпучей среды уже на ранней стадии уплотнения, однако следует учитывать, что из-за малой протяженности нагнетающей стенки количество захватываемой среды невелико. В связи с этим, важной задачей является найти рациональное смещение вершины ячейки относительно ее центра.

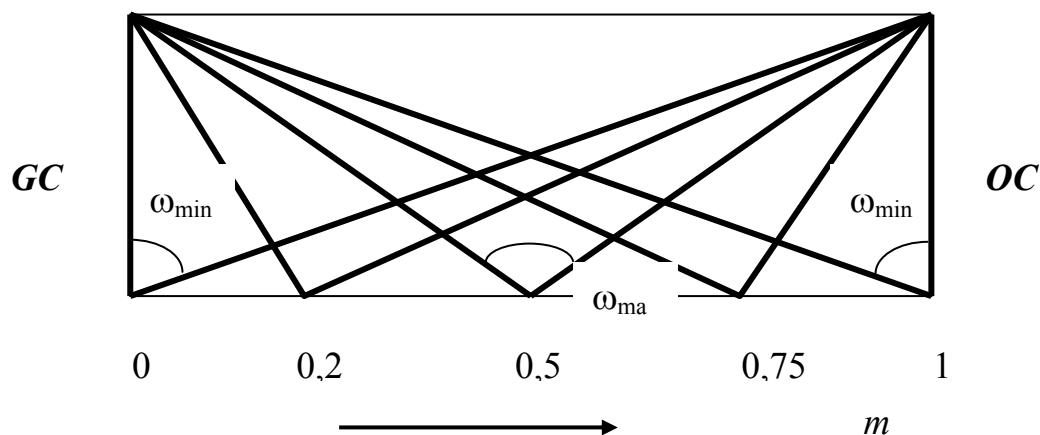


Рис.3. Развертка продольного профиля ячеек с различным соотношением длин нагнетающей стенки ячейки (GC) и оппозитной стенки (OC). Стрелка характеризует направление вращения валков

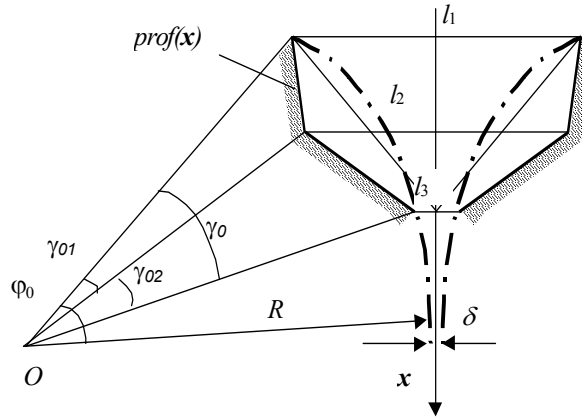


Рис.4. Угловые соотношения в несимметричной ячейке вала

На первый взгляд, для достижения максимальной производительности валкового брикетирования желательно, чтобы захват среды происходил при наиболее ранних стадиях. Это достигается смещением вершины ячейки. Оценкой эффективности уплотнения

может служить соотношение между объемом  $V_a$  сыпучей среды, захваченной ячейками, и объемом полученного брикета  $V_b$ . Объем брикета при плоской постановке задачи может быть определен следующим образом

$$V_b = s \cdot \left[ a_{c1}^2 \cdot \operatorname{ctg} \omega_1 + a_{c2}^2 \cdot \operatorname{ctg} \omega_2 + \delta \cdot (a_{c1} + a_{c2}) \right], \quad (8)$$

где  $s$  – характерный поперечный размер ячейки.

После ввода безразмерного параметра  $m$  получим

$$V_b = s \cdot a_c^2 \cdot \left[ m^2 \cdot \operatorname{ctg} \omega_1 + (1 - m)^2 \cdot \operatorname{ctg} \omega_2 + \frac{\delta}{a_c} \right]. \quad (9)$$

При вращении валков одновременно уплотнению подвергаются несколько брикетов. Однако для упрощения рассуждений назовем границы очага деформации при уплотнении одного брикета и назовем его единичным очагом деформации. На рис.4 показан указанный объем, ограниченный контурами ячеек (они оттенены штриховкой) и двумя прямыми горизонтальными линиями. Профиль ячейки описывается произвольной функцией  $y = \operatorname{prof}(x)$ . Тогда предназначенный для уплотнения объем единичного очага деформации находится путем интегрирования:

$$V_a = s \cdot \frac{R \cdot \sin \varphi_0}{R \cdot \sin(\varphi_0 - \gamma_0)} \int \operatorname{prof}(x) dx. \quad (10)$$

Поскольку в рассматриваемой ситуации профиль ячейки описывается двумя кусочно-непрерывными функциями, то интеграл в формуле (10) может быть записан в виде суммы двух интегралов, каждый один из которых берется относительно проекции на ось  $x$  нагнетающей стенки, а второй – относительно проекции на ось  $x$  оппозитной стенки:

$$V_a = s \cdot \left[ \frac{R \cdot \sin \varphi_0}{R \cdot \sin(\varphi_0 - \gamma_{02})} \int \operatorname{prof}1(x) dx + \frac{R \cdot \sin(\varphi_0 - \gamma_{02})}{R \cdot \sin(\varphi_0 - \gamma_0)} \int \operatorname{prof}2(x) dx \right]. \quad (11)$$

С учетом простейшего задания профиля функций, описывающих нагнетающую  $GC$  и оппозитную  $OC$  стенки  $\operatorname{prof}1(x)$  и  $\operatorname{prof}2(x)$  в виде линейных зависимостей, возможно определение длины  $l_1$  отрезка горизонтальной линии,

ограничивающей анализируемую часть очага деформации сверху:

$$l_1 = 2 \cdot R \cdot (1 - \cos \varphi_0) + \delta, \quad (12)$$

длины  $l_2$  отрезка горизонтальной линии, соединяющей вершины оппозитно расположенных ячеек

$$l_2 = l_1 + 2GC \cdot \sin \theta_1 = 2 \cdot R \cdot [1 - \cos(\varphi_0)] + \delta + 2GC \cdot \sin \theta_1, \quad (13)$$

и длины  $l_3$  отрезка горизонтальной линии, ограничивающей анализируемую часть очага деформации снизу:

$$l_3 = 2 \cdot R \cdot [1 - \cos(\varphi_0 - \gamma_{01} - \gamma_{02})] + \delta. \quad (14)$$

Параметры  $l_i$  ( $i=1,2,3$ ) характеризуют расстояние между валками, при которых может быть осуществлен захват. Можно предположить, что чем больше эти величины, тем большее количество сыпучего материала будет подвергнуто уплотнению и тем большая плотность брикета будет достигнута.

Проекции на ось  $x$  (рис.1,4) нагнетающей и оппозитной стенок ячейки составят величины, соответственно

$$GC_x = GC \cdot \cos \theta_1 = m \cdot a_c \cdot \frac{\cos \theta_1}{\sin \omega_1}; \quad (15)$$

$$OC_x = OC \cdot \cos \theta_2 = (1 - m) \cdot a_c \cdot \frac{\cos \theta_2}{\sin \omega_2}. \quad (16)$$

Сумма проекций стенок ячейки на ось  $x$  составит длину очага деформации  $L_c$  в пределах одной ячейки:

$$L_c = GC_x + OC_x = a_c \cdot \left[ m \cdot \frac{\cos \theta_1}{\sin \omega_1} + (1 - m) \cdot \frac{\cos \theta_2}{\sin \omega_2} \right] \quad (17)$$

В зависимости от конкретных условий захвата полная длина очага деформации может содержать несколько длин  $L_c$ . На этой длине может быть выполнен анализ напряженного состояния в целом для всего очага деформации.

В момент захвата нагнетающей стенкой  $GC$  рассматриваемый объем очага деформации составит величину

$$V_a = \frac{1}{2} s \cdot [GC_x \cdot (l_1 + l_2) + OC_x \cdot (l_2 + l_3)] \quad (18)$$

или с учетом ранее полученных соотношений

$$V_a = \frac{a_c}{2} s \cdot \left[ m \frac{\cos \theta_1}{\sin \omega_1} (l_1 + l_2) + (1 - m) \frac{\cos \theta_2}{\sin \omega_2} (l_2 + l_3) \right]. \quad (19)$$

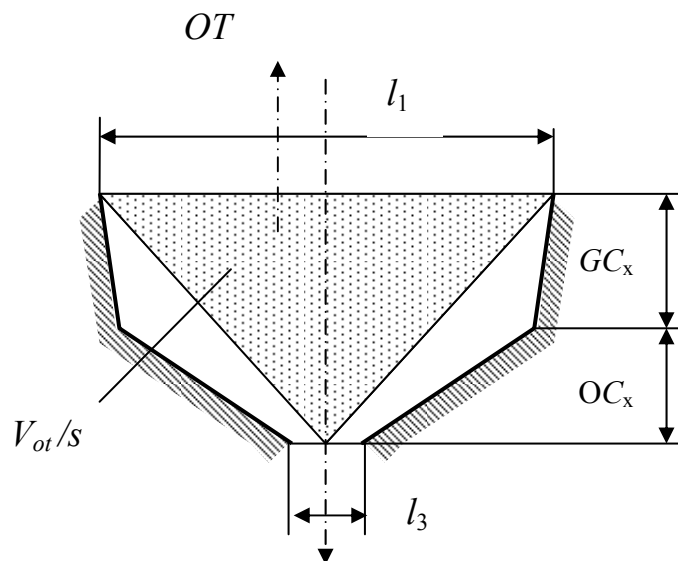


Рис.5. Схема выделения отсесняемого объема узкого очага деформации

Однако брикет формируется не из всего объема материала, заключенного внутри единичного очага деформации. Часть сыпучего материала перемещается из очага деформации против направления прокатки по направлению стрелки  $OT$  (рис.5) и, в результате этого формируется зона оттеснения объемом  $V_{ot}$ . Наличие встречного потока сыпучей среды при прокатке металлических порошков наблюдали в экспериментах, как авторы данной статьи, так и другие исследователи, например [3]. Объем  $V_{ot}$  может быть определен из следующих соображений. При узких очагах деформации, характерных для длинной нагнетающей стенки ячейки  $GC$ , зона оттеснения может быть задана в виде треугольника, имеющего основание  $l_1$  и высоту  $L_c$  (рис.5), т.е.

$$V_{ot} = \frac{1}{2} \cdot l_1 \cdot (GC_x + OC_x). \quad (20)$$

В этом случае деформируемые зоны, создаваемые правой и левой ячейками, имеют возможность соединения на оси  $x$ .

При малых величинах  $m$  нагнетающая стенка ячейки оказывается относительно короткой, а захват сыпучей среды наступает при больших углах  $\varphi_0$ . Это приводит к тому, что в момент захвата стенки  $GC$  на двух оппозитных валках

направление оттеснения). В результате пластическая деформация не проникает вплоть до оси симметрии, поэтому зона оттеснения увеличивается за счет образования разрывов между левой и правой зонами пластической деформации.

Глубина проникновения пластической деформации в последнем случае может быть определена из следующих соображений. Начало пластического уплотнения сыпучего материала можно связать с возникновением ситуации, когда гидростатическое напряжение в некоторой области становится отличным от нуля. В книге [8] приведено решение плоской задачи внедрения жесткого клина в пластическое полупространство. Результат получен с использованием метода линий скольжения. Решением показано, что при внедрении клина шириной  $2a$  гидростатическое давление становится равным нулю на относительном удалении от торца  $h/a$ , равным 4,85. Следует отметить, что решения, полученные с использованием теории напряженного состояния, не зависят от проявления сжимаемости среды. Поэтому это решение может быть приложено применительно к условиям этой задачи.

В связи с вышеизложенными доводами, для широкого очага деформации (т.е. при  $l_1 > 4,85GC$ ) объем зоны оттеснения может быть

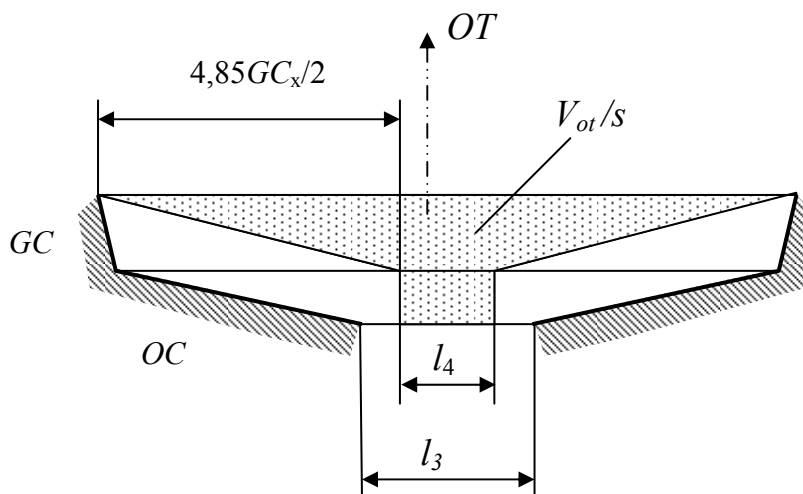


Рис.6. Схема выделения оттесняемого объема широкого очага деформации

расположены далеко друг от друга, и очаг деформации получается широким (рис.6,  $OT$  -

$$V_{ot} = l_4 \cdot GC_x + (l_1 - l_4) \cdot GC/2 + l_4 \cdot OC_x, \quad (21)$$

г

де  $l_4$  представляет собой зазор между пластическими зонами, примыкающими к оппозитным ячейкам:

$$l_4 = l_2 - 4,85 \cdot GC_x. \quad (22)$$

Последняя запись позволяет решить задачу и получить формулу для нахождения коэффициента уплотнения брикета:

найден в соответствии с рис.6 по следующей формуле

$$kd = \frac{V_a - V_{ot}}{V_b}, \quad (23)$$

где все параметры были определены зависимостями, полученными выше.

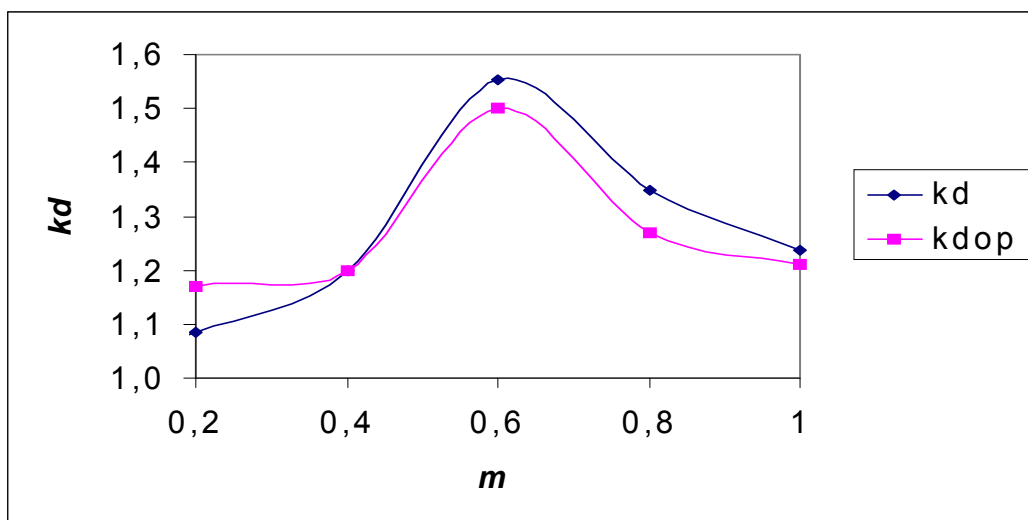


Рис.7. Зависимость расчетного  $k_d$  и опытного  $k_{dop}$  коэффициентов уплотнения при брикетировании с параметрами, указанными на рис.2, коэффициент трения 0,3

Результаты расчета параметра  $k_d$  представлены на графике рис.7.

Полученный график имеет максимум в окрестностях значения  $m=0,6$ , что говорит о необходимости изготовления ячеек с несимметричным профилем, причем вершина ячейки должна быть сдвинута в направлении прокатки. При этом достигается выигрыш в

коэффициенте уплотнения до 15%. Следует отметить, что при этом достигается цель получения наибольшего коэффициента уплотнения в целом по объему брикета, однако другой показатель процесса: равномерность распределения плотности по объему брикета может оказаться не наилучшим[9,10].

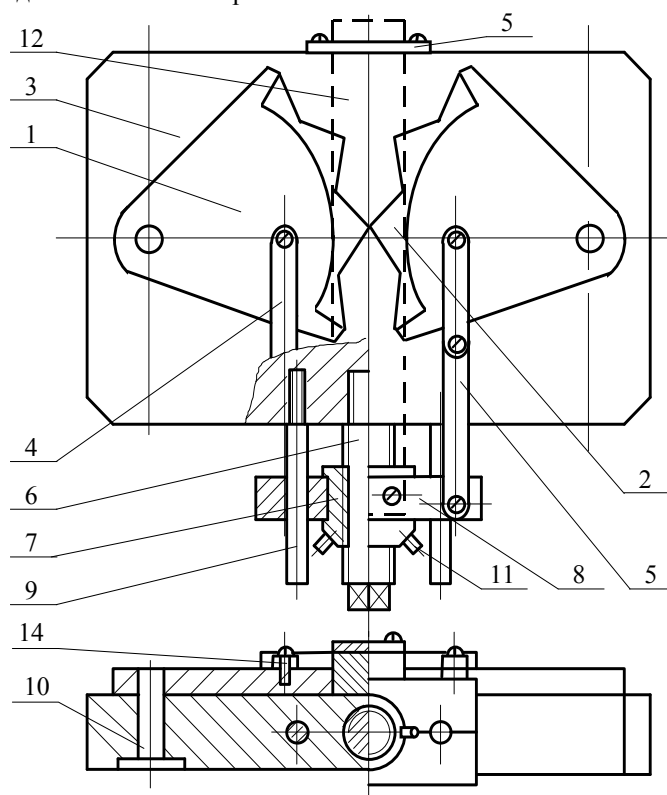


Рис.8. Схема моделирующей установки

Для выявления особенностей деформации брикета была изготовлена модельная установка, конструкция которой подробно описана в статье [9]

и схема которой приведена на рис.8. В двух круговых секторах 1 радиусом 175 мм размещаются вставки 2 с нарезанными на их

рабочей поверхности ячейками. Вставки выполнены сменными для возможности моделирования уплотнения брикетов различной формы. Секторы 1 могут вращаться на закрепленных в плите 3 осях, привод их вращения выполнен в виде тяг 4 и 5, закрепленных винтами 14. С помощью ходового винта 6 и гайки 7 к тягам прикладывается тянущее усилие через траверсу 8, при этом препятствуют вращению траверсы направляющие 9. По лимбу можно фиксировать угловое положение секторов 1 относительно осей 10, изменяемое с помощью рукояток 11. Для ограничения поперечного течения материала служит экран 12, закрепленный при помощи соединения 13.

Поведение сыпучего материала исследовали с помощью набора упругих втулок, имеющих высоту 16мм, наружный диаметр 8мм, толщину стенки 1мм. Выбор такого модельного материала был обусловлен тем, что благодаря наличию отверстий втулки обладали свойством сжимаемости в большом диапазоне прикладываемых давлений. Для имитирования условий плоской деформации втулки укладывались в ячейки без деформации, но при условии плотной упаковки, оси втулок параллельны осям вращения валков. При вращении сегментов часть втулок защемлялась и деформировалась ячейками, что приводило к формированию пластической зоны, а часть втулок выталкивалось из очага деформации, что приводило к формированию зоны оттеснения. Перебор вариантов конфигурации ячеек, характеризующихся параметром  $m$ , производили сменной вставкой, опирающихся на цилиндрическую поверхность валков.

В опытах подсчитывали количество деформированных втулок  $N_d$ , оказавшихся внутри брикета при полном замыкании единичного очага деформации ячейками. Определяли также количество втулок, размещаемое внутри двух замкнутых ячеек при их свободной укладке  $N_c$ . Отношение второй величины к первой являлось экспериментальным коэффициентом уплотнения:

$$k_{доп} = \frac{N_c}{N_d} \quad (24)$$

Полученная зависимость отображена на графике рис.7. Она подтвердила правильность выводов, полученных из математического моделирования ситуации при валковом брикетировании брикетов несимметричной формы.

Дополнительно были проведены эксперименты по определению распределения плотности внутри каждого брикета. Для этого в состоянии сжатия упругих втулок между ячейками определяли количество втулок, зажатых на каждой четверти длины брикета. Во всех случаях выявлено значительное уменьшение коэффициента  $k_{доп}$  при переходе от нагнетающей стенки  $GC$  к оппозитной  $OC$ , т.е. по направлению прокатки. Это обстоятельство говорит о том, что для снижения неравномерности распределения плотности следует

изготавливать ячейки несимметричного профиля, но с вершиной, смещенной против направления прокатки. Производительность процесса при этом будет снижена, но качество брикетов повышено. Необходимость такого решения особенно важна для малопластичных смесей, предназначенных для брикетирования. При деформации пластичных смесей довольно легко осуществляется процесс перераспределения материала и плотности внутри брикета, поэтому последняя рекомендация может не выполняться.

Таким образом, выполнено математическое и физическое моделирование валкового брикетирования сыпучих материалов в несимметричных ячейках. Показано, что при смещении вершины ячейки по направлению прокатки происходит увеличение коэффициента уплотнения, что приводит к повышению производительности процесса. При этом, однако, снижается равномерность распределения плотности по длине брикета. Рекомендовано для пластичных смесей применять смещение вершины брикета против направления вращения валков, а для малопластичных смесей – наоборот, по направлению прокатки. Данные математического моделирования совпадают с данными, полученными на экспериментальной установке.

#### Библиографический список

1. Ложечников Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1987. 184с.
2. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. М.: Металлургия, 1979. 224с.
3. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формование металлических порошков и гранул. Минск: Наука и техника, 1980. 256с.
4. Обработка давлением металлических материалов. /Под ред. А.Ф.Пименова. М.: Наука, 1990. 239с.
5. Радченко К.М. Теория прокатки спеченных полос. Киев: Наукова думка, 1976. 200с
6. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. М.: Металлургия, 1975. 232с.
7. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. Влияние подпора на условия захвата при прокатке сыпучей среды. Известия вузов. Цветная металлургия, 1998, №3, с.28-31.
8. Теорияковки и штамповки. / Е.П.Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др. М.: Машиностроение, 1992. 720с.
9. Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Буркин С.П. Исследование распределения деформаций брикета в ячейке валька брикетировочного пресса. Известия вузов. Черная металлургия, 1999, №6. С.30-33
10. Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Буркин С.П. Объемные деформации при валковом брикетировании отходов металлургического производства. Металлы, 2000, №1. С.48-52